

# ESTUDIO DEL CONCEPTO DEL PARÁMETRO DE ESTABILIDAD DE SHIELDS COMO UN MÉTODO PARA EL DISEÑO DE CANALES EROSIONABLES

**Mario Andrés Córdova Mora**  
**Carolina Elizabeth Vallejo Llerena**  
 Estudiantes Ingeniería Civil

## RESUMEN

En el presente trabajo se expone y analiza, el concepto del parámetro de estabilidad de Shields para establecer las expresiones que permitan el diseño de canales erosionables. En la exposición conceptual de estos procesos se ha incluido un análisis de nuevas relaciones matemáticas para la curva de movimiento incipiente y para determinación del parámetro de estabilidad. El trabajo expuesto constituye un aporte para la difusión de conocimiento y permite disponer de una guía útil para la aplicación del método, en el contexto del curso de Diseño Hidráulico de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

**Palabras clave:** Parámetro de estabilidad, Diagrama de Shields, Umbral de movimiento.

## ABSTRACT

This study discusses and analyzes the concept of the stability parameter in order to set the calculation expressions that allow the design of erodible channels. With the conceptual exposure of these processes, we have included an analysis of new mathematical relationships for the incipient motion curve and for determining the stability parameter. This paper is a contribution to the dissemination of knowledge and indicates a guide to the application of the

method in the context of the course in Hydraulic Design which is taught at the Career of Civil Engineering, Faculty of Engineering of the University of Cuenca.

**Keywords:** Stability parameter, Shields's diagram, Threshold of motion.

## INTRODUCCIÓN

El término umbral de movimiento de sedimentos describe las condiciones de flujo y las condiciones de frontera para las cuales el transporte de sedimentos empieza a ocurrir. El umbral de movimiento de sedimentos no puede definirse con una precisión exacta, sin embargo, la gran mayoría de las observaciones experimentales, han arrojado resultados razonablemente consistentes y de gran potencial en la aplicación al momento de analizar procesos de flujo en obras hidráulicas y manejo de cauces naturales.

Los parámetros relevantes para el análisis del umbral de transporte de sedimentos establecidos en la literatura [1] son:

- El esfuerzo cortante del lecho  $\tau_o$
- La densidad del sedimento  $\rho_s$
- La densidad del fluido  $\rho$
- El diámetro del grano  $d_s$
- La aceleración de la gravedad  $g$
- La viscosidad del fluido  $\nu$

$$f_1(\tau_o, \rho_s, \rho, d_s, g, \nu) = 0 \quad (1)$$

En términos adimensionales, se obtiene:

$$f_2 \left( \frac{\tau_o}{\rho g d_s}; \frac{\rho_s}{\rho}; \frac{d_s \sqrt{\rho \tau_o}}{v} \right) = 0 \quad (2)$$

Al introducirse el concepto de velocidad de corte  $V^*$  definida como:

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (3)$$

La expresión 2 puede transformarse como:

$$f_3 \left( \frac{V_*}{\sqrt{g d_s}}; \frac{\rho_s}{\rho}; \rho \frac{d_s V_*}{v} \right) = 0 \quad (4)$$

Se identifica el primer término como una forma del número de Froude. El segundo es la densidad relativa. El último término es el número de Reynolds definido en términos del tamaño del sedimento y la velocidad de corte  $Re^*$  conocido como número de Reynolds de corte o número de Reynolds de la partícula. Adicionalmente, el número de Reynolds de corte tiene relación con la distribución de velocidades en flujos turbulentos.

Con los parámetros considerados en el análisis precedente, se establece un parámetro adimensional conocido como parámetros de estabilidad definido como:

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{\rho(s-1)g d_s} \quad (5)$$

Considerando que en flujo en canales abiertos [2] para flujo uniforme de equilibrio, la velocidad de corte es igual a:

$$V_* = \sqrt{g \frac{D_H}{4} \sin \theta} \quad (6)$$

Donde  $D_H$  es el diámetro hidráulico y  $\theta$  es la pendiente del lecho. El esfuerzo cortante medio de frontera resulta igual a:

$$\tau_o = \rho g \frac{D_H}{4} \sin \theta \quad (7)$$

Pudiendo, entonces, escribirse el parámetro de estabilidad como:

$$\tau_* = \frac{V_*^2}{(s-1)g d_s} \quad (8)$$

Observaciones experimentales diversas han corroborado la identificación de un valor crítico del parámetro de estabilidad, en el umbral de movimiento del lecho donde se cumple que  $\tau_* = (\tau_*)_c$ . Shields (1936) demostró que  $(\tau_*)_c$  es, ante todo, una función del número de Reynolds de corte  $V_* d_s / \nu$ .

Para esta condición, el movimiento de la carga del lecho ocurrirá entonces para:

$$\tau_* > (\tau_*)_c \quad (9)$$

En resumen: el inicio del transporte de la carga del lecho, ocurre cuando el esfuerzo cortante de lecho  $\tau_o$  es mayor que un valor crítico:

$$(\tau_o)_c = \rho(s-1)g d_s (\tau_*)_c \quad (10)$$

El concepto introducido por Shields) para el parámetro de estabilidad tiene una amplia aplicación para modelos numéricos, lo cual ha hecho necesario buscar expresiones que representen los datos experimentales [3], donde se indica la ecuación de Guo [4] para el parámetro de estabilidad de Shields la siguiente:

$$(\tau_*)_c = \frac{0.11}{R_{*c}} + 0.054 \left[ 1 - e^{-\frac{4 R_{*c}^{0.52}}{25}} \right] \quad (11)$$



Para el presente trabajo, la ecuación anterior ha sido desarrollada y contrastada con los gráficos disponibles en la literatura obteniéndose el siguiente diagrama:

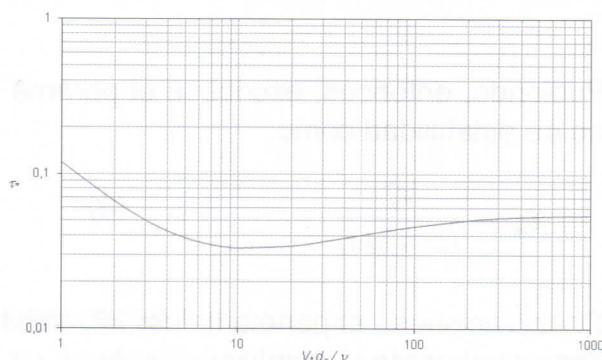


Figura 1: Diagrama del parámetro de estabilidad de Shields según Guo, 2002. Adaptado de (Pacheco, 2004)

El número de Reynolds de la partícula refleja la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas por efectos de viscosidad en el entorno de un grano; es decir, el grado de turbulencia. Se nota que a mayor valor de  $Re^*$ , se tiene mayor turbulencia alrededor de la partícula teniéndose la tendencia horizontal de la curva del diagrama. Se indica que para  $Re^* > 400$ , el flujo corresponde a turbulento rugoso, dado que el valor del diámetro  $d$  es mayor que el espesor de la capa límite laminar ( $\delta$ ). Para valores  $Re^* < 5$  el movimiento corresponde a turbulento liso; mientras que, para valores comprendidos entre 5 y 400, el movimiento es turbulento intermedio. Se desprende que para flujo en estado turbulento rugoso, el esfuerzo requerido para iniciar el movimiento, solamente dependerá del valor crítico aproximado en 0,056.

Julien (1995) [6], indica para el parámetro crítico de Shields, las expresiones siguientes:

$$(\tau_*)_c = 0.013 d_*^{0.84} \tan(\phi_s) \quad \text{para: } 19 < d_* < 50 \quad (12)$$

$$(\tau_*)_c = 0.06 \tan(\phi_s) \quad \text{para: } 50 < d_* \quad (13)$$

donde  $s$  es el ángulo de reposo y  $d^*$  es el parámetro de partícula definido como:

$$d^* = d_s [(s-1)g / \nu^2]^{1/3} \quad (14)$$

Para analizar el estado de equilibrio en canales y cauces con pendiente empinadas, se debe considerar una corrección para el parámetro de estabilidad, así como para la velocidad de corte en el estado crítico.

La corrección dada para canales empinados [5] define al parámetro de estabilidad como:

$$(\frac{\sin(\phi_s - \theta)}{\sin\phi_s}) \tau_* \quad (15)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de reposo del material, y  $\theta$  es la pendiente del lecho.

Para la velocidad crítica de corte, se indica la corrección para movimiento en pendientes empinadas propuesta por Chiew y Parker (1994) [7].

$$(\cos\phi_s (1 - \tan\theta / \tan\phi_s))^{1.5} \quad (16)$$

## CONCLUSIONES

Un canal artificial no revestido o un canal natural en el cual se tiene el flujo de una corriente, estará sujeto a riesgos de erosión o desprendimiento de las partículas que lo conforman, debido a un desbalance de las fuerzas estabilizadoras en contraposición con las fuerzas de arrastre.

El movimiento de partículas ocurrirá cuando los momentos de fuerzas desestabilizantes (es decir, arrastre, sustentación, flotación) con respecto al punto de contacto, superen al momento estabilizante de la fuerza del peso. El entendimiento del umbral de movimiento o condición crítica de movimiento de arrastre de fondo es un problema de actualidad en investigación, relacionada a la hidráulica fluvial con relevancia práctica en el establecimiento de criterios de diseño en canales.

El método pone a consideración un procedimiento más elaborado y desarrollado con mayores fundamentos que otros métodos, como por ejemplo: el de la velocidad límite. El conocimiento disponible, hasta el momento, es el resultado de experimentación en laboratorio, en arenas uniformes que se plasma en el diagrama de Shields. No se dispone de información suficiente que corrobore los resultados en cauces naturales de montaña.

El método considera exclusivamente los efectos directos por la circulación del agua, se identifica como relevante realizar experimentación hidráulica en laboratorio, para el análisis de condiciones particulares en términos de la influencia adicional de: la granulometría, peso específico, efectos coloidales, pendiente, turbulencia, morfología, etc.

Adicionalmente se debe señalar que, el umbral de movimiento corresponde a una franja con una dispersión correspondiente a los factores no considerados en la deducción

## AGRADECIMIENTO

Damos nuestro especial reconocimiento al Ing. Esteban Pacheco T, quien a través de la cátedra de Diseño Hidráulico ha incentivado nuestra participación en la revista "Galileo", órgano de difusión de la Facultad de Ingeniería y, además, nos ha dirigido en la ejecución y desarrollo del tema planteado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHANSON H. (2002). *The hydraulics of open channel flow*. Arnold. New York, USA
- [2] STREETER, V. L., WYLIE, E. B. (1988). *Mecánica de los Fluidos*, McGraw-Hill
- [3] PACHECO, Esteban (2004) *Equilibrio del proceso de transporte de sedimentos en cárcavas y torrentes intervenidos en la cuenca hidrográfica del río Paute. Trabajo investigativo para obtención del grado de Magíster en manejo y conservación de los recursos Agua y Suelo MSc. Universidad de Cuenca, Cuenca*
- [4] GUO J. (2002) *Hunter Rouse and Shields diagram. Proceedings of the 13th IAHR-APD Congress. Singapore (1096-1098)*
- [5] RIJN L. C. VAN (1993) *Principles of Sediment Transport in rivers, estuaries and coastal seas. (Aqua: Amsterdam, The Netherlands) p.41*
- [6] JULIEN P. Y. (1995) *Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press. Cambridge-UK*
- [7] CHIEW Y. M. – PARKER G. (1994) *Incipient sediment motion on non horizontal slopes. Journal of Hydraulic Research: 32, 649-660*